

## 다중층 음향 재료의 투과손실 예측과 측정

### Prediction and Measurement of Sound Transmission Loss for Multi-layered Acoustical Materials

박 소 희\* · 강 연 준† · 박 철 민\*\* · 채 기 상\*\*

So-Hee Park, Yeon-June Kang, Chul-Min Park and Ki-Sang Chae

(2007년 4월 9일 접수 ; 2007년 10월 12일 심사완료)

**Key Words** : Sound Transmission Loss(투과 손실), Multi-layered Acoustical Material(다중층 음향재료), Mass-law(질량 법칙), Sound Intensity Method(인텐시티법), Transfer Matrix Method(전달행렬법)

#### ABSTRACT

In this paper, the predictions and measurements of sound transmission loss(STL) are discussed for various types of acoustical materials and carpets. Random incidence sound transmission losses are measured by the sound intensity method. The in-house software HONUS2005 is used to predict TL and estimate the various physical properties such as the flow resistivity, the structure factor, the porosity, the Possion's ratio, and etc. After this estimation, various multi-layered materials with a steel plate are measured and predicted. In particular, Carpets are assumed to be membranes to predict acoustical performance. To confirm this assumption, double and triple-layered cases are also observed including two different kinds of carpets.

#### 1. 서 론

엔진 등 차량 자체에서 발생하는 소음들은 같은 주파수의 위상이 반대인 소음을 발생시켜 상쇄시키는 능동소음제어(active noise control)를 통하여 제거할 수 있지만, 다양한 차량 주행 환경에 따라 발생하는 여러 가지의 소음을 차단하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 외부의 소음원에 의해 발생하는 소음을 차단할 때는 흡차음재를 사용해 수동소음제어(passive noise control)를 하게 된다. 흡차음재는 소음의 흡음 및 차음을 위해 단일층 혹은 다중층으로 구성되며, 이를 일반적으로 다중층 음향재료라고 부른다.

이러한 음향재료 관련 연구는 다양한 방법으로 이루어졌다. Biot<sup>(1,2)</sup>은 고체상과 유체상의 응력과 변형을 관계 및 부피에 작용하는 힘과 그 힘에 의해 발생하는 운동과의 관계를 이용하여 평형방정식을 유도하였다. 이를 바탕으로 다공성 재료의 고체상과 유체상을 통하여 전달되는 음파를 파동방정식으로 표현하였다. Bolton<sup>(3)</sup>은 이러한 파동방정식을 각 방향에 대한 고체상과 유체상의 변위로 표현하는 식을 유도하였다. 또한 소음의 차단 정도를 나타내는 투과손실에 관한 연구도 진행되었다. Fahy<sup>(4)</sup>은 음향 인텐시티 측정에 관한 연구를 하였고 Cops와 Minten<sup>(5)</sup>은 랜덤 입사 투과손실의 측정법인 간향실 법과 인텐시티법을 비교했으며, Renji<sup>(6)</sup>는 전단 변형이 고려된 평판 굽힘 진동에 의한 투과손실을 연구하였다. 또한 Allad<sup>(7)</sup>의 이론에 따라 전달행렬을 이용하여 음향특성을 연구<sup>(8,9)</sup>하거나 물성치 보간 기법을 이용하여 다중층 흡음재 내의 다공성 물질층과 공기층을 하나의 지배 방정식으로 해석<sup>(10)</sup>을 하는

† 교신저자 : 정희원, 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : yeonjune@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-1691, Fax : (02)888-5950

\* 정희원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 현대자동차

연구도 이루어지고 있다.

이 연구에서는 소음의 차단 정도를 나타내는 투과손실의 예측과 측정에 초점을 맞추었다. 또한 투과손실의 예측 시 필요한 재료들의 물성은 이 연구실에서 개발한 물성 추정 및 음향 성능 예측 프로그램(HONUS2005)을 이용하여 추정하였다<sup>(11)</sup>. HONUS 2005는 Biot이론을 기반으로 음향 재료의 물성을 추정하며, 경계면에서 힘과 변위의 경계 조건을 이용한 전달행렬법을 이용하여 음향 성능을 예측하는 소프트웨어이다. 물성을 추정하기 위해서는 흡음률 데이터가 요구되며, 임피던스 튜브(impedance tube)를 이용하여 수직 입사 흡음률을 측정하였다. 추정된 음향 재료의 물성은 투과손실의 예측에 사용된다. 예측된 투과손실은 인텐시티법을 이용하여 측정된 투과손실과 비교하였다.

측정된 투과손실은 차량 프레임에 사용되는 두께 0.8 mm 철판에 일반적으로 차량의 내장재로 쓰이는 다양한 흡차음재와 기존에 이루어지지 않은 카펫과 같은 내장재를 부착하여 실험하였다. 마지막으로 투과손실 성능 확인과 함께 실험을 수행할 때 발생할 수 있는 오차의 원인과 실제 차량에 장착했을 때의 문제점 등을 고찰하였다.

## 2. 인텐시티법

랜덤 입사 투과손실을 측정하는 측정방법에는 잔향실법과 인텐시티법이 있다. 잔향실법(two room method)은 음원실과 수음실이 모두 잔향실이고 시편 장착 후 음원을 가진 시켰을 때 각 잔향실의 음압을 측정하여 투과손실을 계산하는 방법이다. 인텐시티법(sound intensity method)은 음원실은 잔향실이고, 수음실은 무향실로 구성되며, 시편에 표시한 격자에서 인텐시티를 측정하여 투과손실을 측정하는 방법이다.

잔향실법과 인텐시티법 모두 음향재료의 총투과손실을 측정할 수 있다. 하지만 잔향실법은 사용하면 음향 파워만을 측정하기 때문에 다중층으로 구성된 시편의 부위별 투과 에너지나, 다중 경로를 가진 불균일한 시편의 총투과손실에 기여하는 상대적인 양을 구할 수 없다는 단점이 있다. 반면에 인텐시티법은 시편을 일정한 격자로 나눈 후 각 지점의 단위 면적 당 파워를 나타내는 인텐시티를 측정하기 때

문에 다중층으로 구성된 시편의 각 위치에 대한 투과 에너지 혹은 다중경로를 지닌 불균일 시편의 총투과손실에 대한 상대적인 기여량을 알 수 있으므로 잔향실법에 비해 인텐시티법이 시편에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다<sup>(5)</sup>.

인텐시티법을 이용한 투과손실을 구하기 위해서는 음원실과 수음실에서의 인텐시티를 구해야 한다. 잔향실법에 사용된 음원실의 확산음장에 대한 인텐시티는 우선 음원실 내의 확산음장에서의 인텐시티는 다음과 같은 식을 이용하여 구한다.

$$I_i = \frac{p_{rms}^2}{4\rho c} \quad (W/m^2) \quad (1)$$

여기서  $p_{rms}$  는 공간 평균 음압이다.  $\rho$  는 공기의 밀도이고,  $c$  는 공기 중의 소리의 속도이다. 수음실에서의 인텐시티( $I_t$ )는 두 마이크로폰법(two microphone method)을 이용하여 측정하게 된다. 이렇게 구한 인텐시티 결과를 이용하여 투과손실은 아래의 식과 같이 계산한다.

$$STL = L_t - L_i = 10 \log \frac{I_i}{I_t} \quad (dB) \quad (2)$$

$L_i, L_t$  는 각각 음원실의 인텐시티 레벨과 수음실의 인텐시티 레벨을 나타낸다.

잔향실과 무향실은 Fig. 1과 같다. 수음실의 경우, 시편이 장착되는 부분의 양쪽에 높이 180 cm 전체 폭 100 cm인 웨지 두 세트를 설치하여 자유 음장이 형성되도록 하였다.

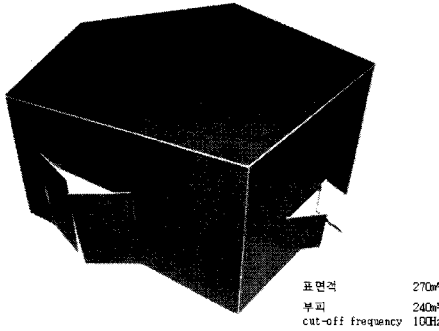
잔향실의 사양은 표면적이 237 m<sup>2</sup>, 부피 240 m<sup>3</sup>, 차단주파수는 100 Hz이다. 잔향실 내에서의 음압은 마이크로폰을 16초 주기로 회전하게 하여, 공간 평균한 음압을 측정하였다. 무향실에서는 B&K의 PULSE System과 인텐시티 프로브3595를 이용하여 인텐시티를 측정하였다. 두 마이크로폰의 거리에 따라 주파수 신뢰 구간이 다르므로, 인텐시티를 측정하는데 사용되는 스페이서(spacer)의 길이는 측정주파수에 따라 달라진다. 이 논문에서는 인텐시티를 측정할 때 50 mm와 8.5 mm의 두 개의 스페이서를 사용하였다. 스페이서에 따른 측정구간은 Table 1과 같다. 1/3 옥타브밴드에서 1개의 측정점 당 평균 시간 12 초로 측정하였다.

**Table 1** The type of spacer as frequency range

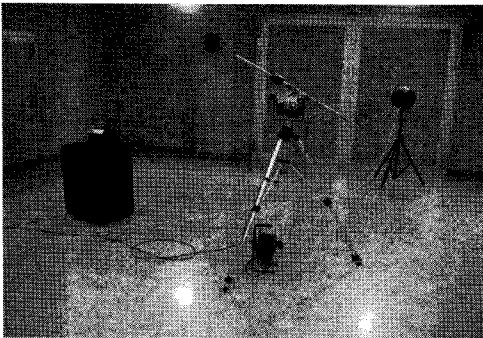
Frequency	Spacer
100 Hz ≤ f ≤ 1000 Hz	50 mm
1000 Hz < f ≤ 6300 Hz	8.5 mm

**Table 2** The type of speaker and excited frequency range

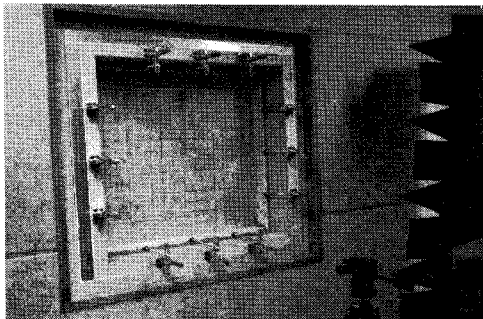
Spacer	Omnisource speaker	B&W 801 speaker
50 mm	0 Hz ≤ f ≤ 1600 Hz	40 Hz ≤ f ≤ 440 Hz
8.5 mm	0 Hz ≤ f ≤ 6400 Hz	0 Hz ≤ f ≤ 3200 Hz



(a) A small model of the reverberation room



(b) A source room (the reverberation room)



(c) A receiving room (the anechoic room)

**Fig. 1** Experimental setup of transmission loss

840×840(mm<sup>2</sup>)크기의 시편에 일정한 간격으로 5×5의 25개 격자를 표시하였다. 관심 주파수대를 골고루 가진하기 위해 2개의 스피커를 동시에 가진 하였다. 각 스페이서로 측정할 때 사용된 스피커의 종류와 가진주파수는 Table 1과 2에 나타내었다.

### 3. 전달행렬법

이 실험실에서 개발된 음향 성능 예측프로그램 (HONUS2005)은 Biot이론<sup>(1,2)</sup>과 Bolton<sup>(3)</sup>이 보여준 각 방향에 대한 고체상과 유체상의 응력과 변위 관계식을 이용하였다. 전달행렬은 응력과 변위의 관계식에 탄성 포움의 입사면과 투과면의 경계 조건을 적용하여 탄성 포움에 대한 2×2의 전달행렬로 구할 수 있는데<sup>(12)</sup>, 이를 토대로 흡음률이나 투과손실과 같은 탄성 포움의 음향학적 성능을 구할 수 있게 된다. 전달행렬은 음향재료의 종류와 경계조건에 따라 다양하다. 이 논문에서는 카펫류에 대한 음향 성능의 예측이 가능한 모델인 얇은 막에 대한 전달행렬 유도식을 제시하였다.

오일러-베르누이 패널에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$p^L - p^R = D \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m_s \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

여기서  $p^L$  과  $p^R$  은 각각 패널의 입사면과 투과면의 음압이고,  $D$  는 패널의 단위 폭 당의 굽힘 강성이고,  $m_s$  는 단위 면적당 질량,  $w(x,t)$  는 패널의 수직 방향 변위 이다. 패널이 매우 얇다고 가정하면 패널 경계에서의 속도는 같게 되므로 속도 경계조건은 다음과 같다.

$$v_y^L = v_y^R = \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \quad (4)$$

여기서  $v_y^L$  과  $v_y^R$  은 패널의 입사면과 투과면 상의 수직 입자 속도이다. 패널의 조화 운동, 즉  $w(x,t) = W(x)e^{j\omega t}$  을 가정하면 식 (3)과 (4)는 아래와 같은 식이 된다.

$$p^L - p^R = (Dk_x^4 - \omega^2 m_s) \frac{v_y^R}{j\omega} \quad (5)$$

$$v_y^L = v_y^R \quad (6)$$

식(5)와 (6)은 행렬식으로 표현할 수 있고 따라서 패널에 대한 전달 행렬을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} p \\ v_y \end{Bmatrix}_L = [T_p] \begin{Bmatrix} p \\ v_y \end{Bmatrix}_R \quad (7)$$

$$[T_p] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega} (Dk_x^4 - \omega^2 m_s) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

패널은 굽힘에 대한 저항을 갖지만 막의 경우는 굽힘에 대한 저항력이 없다는 것이 얇은 막과 패널의 물리적 성질의 차이이다. 따라서 패널의 식(8)에서 굽힘 강성  $D=0$ 의 경우 얇은 막에 대한 전달 행렬을 얻을 수 있다.

$$[T_m] = \begin{bmatrix} 1 & j\omega m_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

다중층 흡차음재의 전달행렬은 각 층을 구성하는 음향재료의 전달행렬의 곱으로 표현할 수 있다.

$$[T_m]_{total} = [T_m]_1 [T_m]_2 \cdots [T_m]_n \quad (10)$$

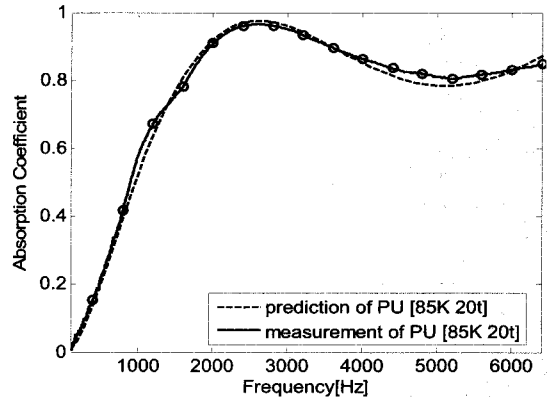
#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 음향재료의 물성 추정

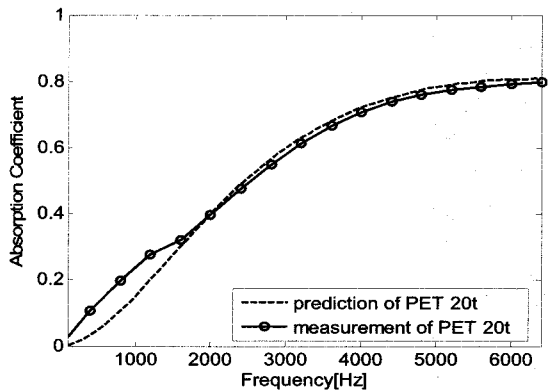
물성 추정 및 음향 성능 예측 프로그램을 이용하면 흡음률이나 투과손실과 같은 탄성 포음의 음향학적 성능뿐만 아니라 재료의 물성도 예측할 수 있다. 물성 예측을 하기 위해 수직입사 흡음률 데이터를 사용하였다<sup>(13)</sup>.

폴리우레탄(PU), 폴리에스테르(PET), 글래스울(GW)의 수직 입사 흡음률은 Fig. 2과 같다. Fig. 2(a), (b), (c)는 추정한 물성치로부터 예측된 수직 입사 흡음률과 측정된 수직 입사 흡음률을 비교하였다. PU 포음의 경우 1,000 Hz까지는 흡음률이 급격히 증가하다가 그 이후로는 증가폭이 줄어들어 2,000 Hz부터는 오히려 감소하는 경향을 보였다. PET와 GW의 경우 고주파수대로 갈수록 흡음률은 증가하지

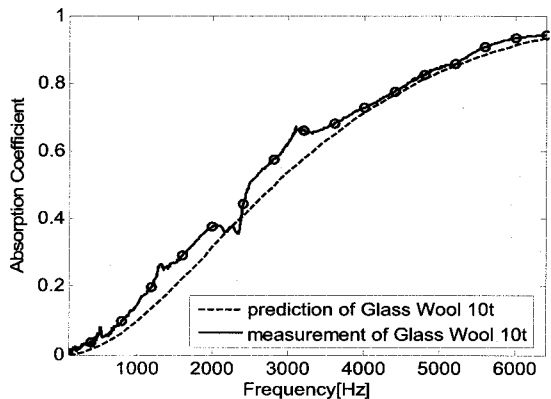
만 흡음률의 증가율은 감소함을 알 수 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 예측값과 측정값은 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이와 같은 흡음률 측정 결과를 이용하여 각 재료의 물성을 추정하였다.



(a) Polyurethane (PU)



(b) Polyester (PET)



(c) Glass wool (GW)

Fig. 2 Prediction and measurement of absorption coefficient for normal incidence

4.2 투과손실의 예측과 측정

차량의 가장 두꺼운 두께에 해당하는 0.8 mm 철판의 투과손실의 측정값과 질량법칙(mass-law)<sup>(14)</sup>를

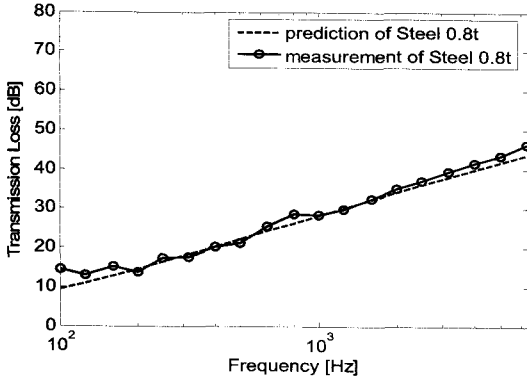
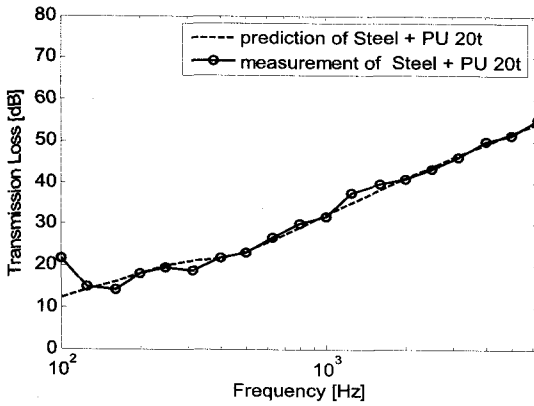


Fig. 3 Prediction and measurement of transmission loss for steel 0.8 mm

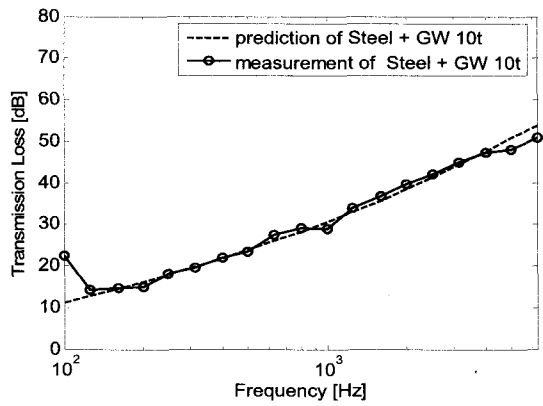
이용한 철판의 예측값을 비교한 결과는 위의 Fig. 3과 같다. 측정된 결과는 질량법칙을 따라 선형적으로 증가함을 확인하였다.

또한 이 철판에 PU, PET, GW를 부착하여 투과손실을 측정하였다. 철판을 입사면으로 하고 철판과 흡음재는 테이프로 고정하였다. 투과손실의 측정 및 예측 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4와 같이 HONUS 2005를 이용하여 추정한 물성치들을 이용하여 예측한 투과손실과 인텐시티법을 이용하여 측정된 투과손실을 비교하면 거의 일치한다. 또한 철판과 흡음재를 부착한 다중층의 경우 철판만으로 구성된 단일 차음재보다 차음 성능이 고주파수대에서 약 3 dB에서 5 dB 이상 향상시킬 수 있다.

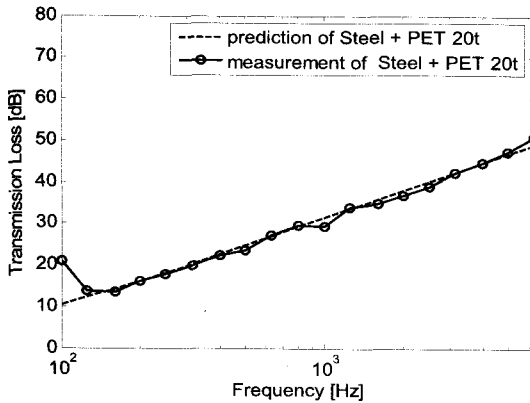
실험에 사용된 PU 포음과 철판의 2중층의 경우 같은 두께의 PET를 사용했을 때보다 고주파대역 차음 성능은 6,300 Hz 기준으로 약 5 dB 정도 증가되



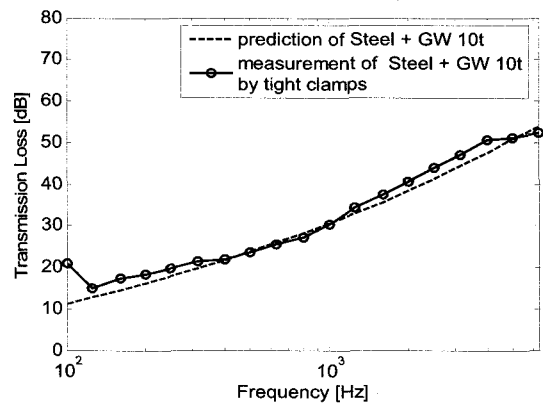
(a) Steel 0.8 mm with PU 20 mm



(c) Steel 0.8 mm with GW 10 mm



(b) Steel 0.8 mm with PET 20 mm



(d) Steel 0.8 mm with GW 10 mm by the tight clamps

Fig. 4 Prediction and measurement of transmission loss

었고, 저주파수 대역 차음성능은 단일 철판의 투과 손실과 같이 질량법칙을 따라 증가한다. 두께는 같고 밀도는 다른 PET 또는 PU를 이용하여 철판과 2중층으로 구성할 때는 PET를 철판과 2중층으로 구성했을 때에 비해 밀도가 더 큰 PU가 총투과손실에 영향을 더 많이 끼친다는 것을 확인하였다.

Fig. 4의 (c)와 (d)는 같은 GW를 측정된 결과이다. Fig. 4의 (c)는 정상적인 고정으로 측정이 잘 된 경우이고 Fig. 4의 (d)는 과도한 클램프의 고정힘에 의해 투과손실이 정확하게 측정되지 않은 경우이다.

전달행렬법의 경계조건은 자유단으로 가정하므로 고정장치의 과도한 압력은 자유단 조건이 아닌 고정단 조건으로 변화시켜 강성이 증가하게 된다. 따라서 투과손실 측정 결과가 왜곡되어 실제 투과손실에 비해 크게 측정됨을 Fig. 4의 (d)에서 확인할 수 있다. 따라서 정확한 투과손실을 측정하기 위해서는 시편을 장착하고 고정시킬 때 유의해야 한다.

다음으로 카펫류가 포함된 다중층의 투과손실을 살펴보았다. 카펫의 경우 비닐 등과 같은 재질의 얇은 막 위에 여러 종류의 코팅재가 다중으로 쌓여있고, 그 위에 실을 돌출시킨 복잡한 형태이기 때문에 기존의 음향재료 구분 기준으로 분류하기 매우 어려운 재료이다. 카펫은 표면이 섬유사로 구성되어 있다는 점에서 Limp 포음으로 볼 수 있으나, 실제로 카펫의 실 부분의 유동저항계수를 측정할 수 없고 불규칙한 표면으로 인하여 임피던스 튜브로 수직 입사 흡음률을 측정하기 어렵기 때문에 HONUS2005를 이용한 물성 추정에는 불가능했다.

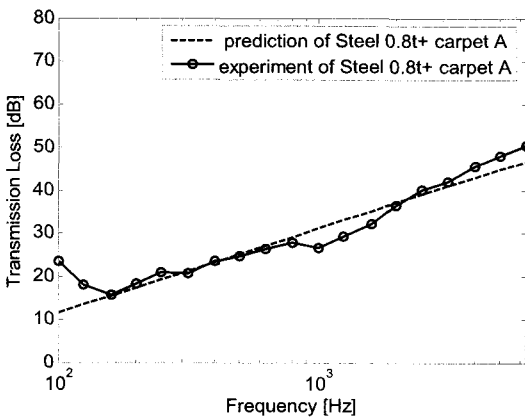


Fig. 5 Prediction and measurement of transmission loss for steel 0.8mm with carpet A

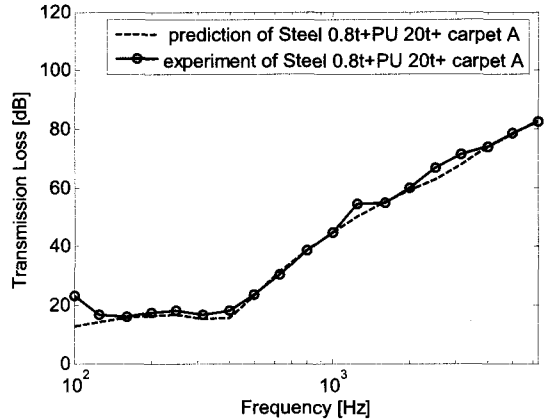


Fig. 6 Prediction and measurement of transmission loss for steel 0.8 mm, PU 20 mm with carpet A

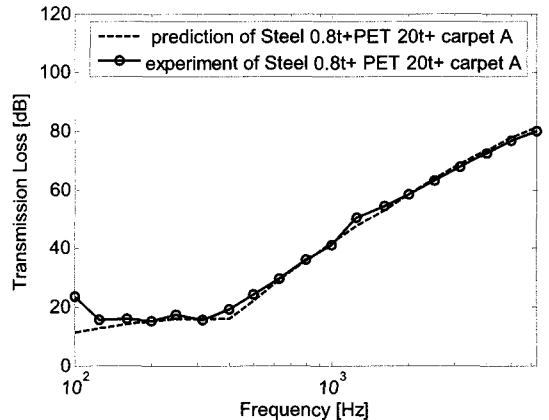


Fig. 7 Prediction and measurement of transmission loss for steel 0.8 mm, PET 20 mm with carpet A

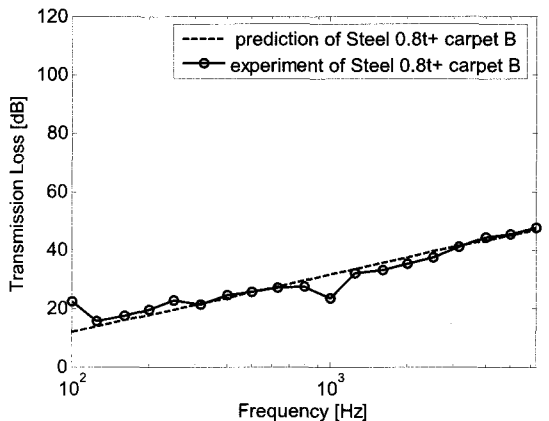


Fig. 8 Prediction and measurement of transmission loss for steel 0.8 mm with carpet B

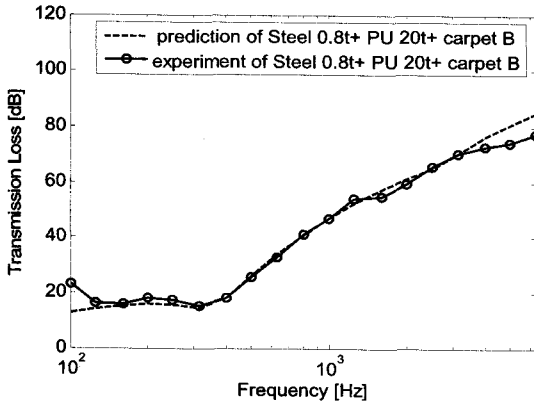


Fig. 9 Prediction and measurement of transmission loss for steel 0.8 mm, PU 20 mm with carpet B

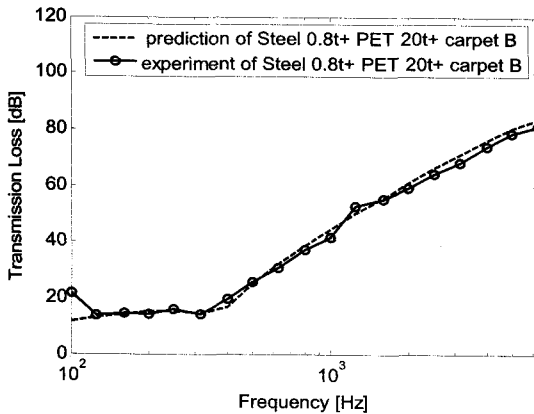


Fig. 10 Prediction and measurement of transmission loss for steel 0.8 mm, PET 20 mm with carpet B

따라서 이러한 카펫류를 일종의 얇은 막으로 가정하여 예측과 측정을 했고 그 결과는 Fig. 5~10과 같다.

철판과 카펫만의 2중층으로 구성된 Fig. 5, 8보다 중간에 흡음재들을 삽입하여 3중층으로 구성된 Fig. 6과 7, 9과 10의 투과손실이 약 30 dB 정도 크게 향상되었다. 이는 흡음재가 철판과 카펫 사이에서 에너지 소산을 증대시켰기 때문인 것으로 추측된다.

또한 철판과 카펫 A, 철판과 카펫 B인 2중층으로 구성된 Fig. 5, 8은 다른 3중층 시편들에 비해 상대적으로 1,000 Hz 부근에서 오차가 큰 편이었다. 이는 부분적으로 철판과 카펫 사이에 공기층이 생겨 카펫이 진동하면서 발생한 오차에 기인한다고 추측된다. 철판에 바로 카펫을 붙였을 때보다 철판

에 PU나 PET를 붙인 후 카펫을 부착했을 때 부착 상태가 더 양호하였다. 부분적으로 밀착하지 않아 카펫이 진동하게 되는 현상은 원하는 투과손실 성능을 얻는데 방해하는 요소로 실제 차량에 장착할 경우에도 각별한 주의가 요구된다. 실제로 차실 내부도 부분적으로 시편 간에 분리되는 현상이 발생하기 때문에 이러한 점은 투과손실 성능을 저하시키는 원인이 될 수 있다는 가능성을 이 실험을 통해 확인하였다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 전달행렬법을 통해 추정된 물성을 이용하여 다양한 흡차음재의 투과손실을 예측하고, 인텐시티법을 통해 임의의 입사에 대한 투과손실을 측정 및 비교하였다. 또한 차실 내장재로 많이 쓰이는 카펫을 얇은 막으로 가정하고 카펫이 포함된 다양한 흡차음재의 투과손실을 예측하고 측정했다.

실험에 사용된 PU, PET, GW의 경우 두께가 같더라도 음향 성능이 다르므로 다중층을 구성하는 방법이 음향 성능 향상에 중요한 영향을 끼친다. 또한 같은 시편을 측정한다 하더라도 고정하는 방법에 따라 결과가 다르게 나올 수 있음을 확인하였다. 따라서 정확한 투과손실을 측정하기 위해서는 시편의 고정에 유의해야 함을 알 수 있었다.

기존의 음향모델로 구분하기 어려운 카펫의 경우 얇은 막으로 가정하여 투과손실을 예측하였고, 실험과 비교한 결과 예측과 매우 근접하게 나타났다. 따라서 카펫의 간단한 해석을 할 경우엔 얇은 막으로 가정하면 비교적 실험과 유사한 예측 결과를 얻을 수 있다.

카펫의 부착상태에 따라 투과손실 성능이 달라질 수 있으므로 실제 차량에 장착 시 밀착되지 않으면 원하는 성능을 발휘할 수 없음을 확인하였다. 실제 차량에 카펫류가 많이 쓰이고 해석할 때 보다 정교한 모델링을 필요로 하는 만큼 향후 연구에서는 카펫 종류의 음향 모델링이 중요하다.

### 후 기

이 논문은 (주)현대자동차의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Biot, M. A. 1956, "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-saturated Porous Solid. I. Low-frequency Range", The Journal of the Acoustical Society of America., Vol. 28, No. 2, pp. 168~178.
- (2) Biot, M. A., 1956, "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range", The Journal of the Acoustical Society of America., Vol. 28, No. 2, pp. 179~191.
- (3) Bolton, J. S., 1996, "Sound Transmission through Multi-panel Structures Lined with Elastic Porous Materials", Journal of Sound and Vibration, Vol. 191, No. 3, pp. 317~347.
- (4) Fahy, F. J., 1989, "Sound Intensity", E&FN Spon, London.
- (5) Cops, A., Minten, M., 1984, "Comparative Study between the Sound Intensity Method and the Conventional Two-room Method to Calculate the Sound Transmission Loss of Wall Constructions", Noise Control Engineering Journal, Vol. 22, pp. 104~111.
- (6) Renji, K., 2005, "Sound Transmission Loss of Unbounded Panel in Bending Vibration Considering Transverse Shear Deformation", Journal of Sound and Vibration, Vol. 283, pp. 478~486.
- (7) Allad, J. F., 1993, Propagation of Sound in Porous Media: Modeling Sound Absorbing Materials, Elsevier Science, New York.
- (8) Park, C. H., 1996, "A Study on the Acoustic Properties of Porous Material by Using Acoustic Transfer Matrix", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 6, No. 5, pp. 635~644.
- (9) Lee, D. H., 2002, "Estimation of the Sound Absorption Performance for Multiple Layer Perforated Plate Systems by Transfer Matrix Method", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 9, pp. 709~716.
- (10) Kim, E. I., 2006, "One-dimensional Topology Optimization for Transmission Loss Maximization of Multi-layered Acoustic Foams", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 938~941.
- (11) Kim, Y. J., Kang, Y. J. and Kim, J. S., 2005, "Parameters Estimation and Performance Prediction of Acoustical Materials", 12th International Congress on Sound and Vibration, Portugal, Lisbon.
- (12) Kang, Y. J., 1994, "Studies of Sound Absorption by and Transmission through Layers of Elastic Noise Control Foams: Finite Element Modeling and Effects of Anisotropy", Ph. D thesis, Purdue University, America.
- (13) Kim, Y. J., Kang, Y. J. and Kim, J. S., 2005, "A Study on Estimation Method for Physical Properties of Sound Absorbing Materials", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference (Automatics Part), pp. 118~121.
- (14) Kinsler, L. E., Frey, A. R. et. al., 2000, "Fundamental of Acoustics", John Wiley & Sons, Inc., New York.